

飞机蒙皮激光除漆对基材表面完整性的影响

杨文锋^{1*}, 常学东¹, 胡月¹, 李绍龙¹, 曹宇², 李庆¹¹中国民用航空飞行学院民机复合材料维修研究中心, 四川 广汉 618307;²温州大学激光与光电智能制造研究院, 浙江 温州 325035

摘要 为了验证激光清洗飞机蒙皮表面漆层的可行性, 阐明漆层清除对基材表面完整性的影响, 采用脉冲光纤激光器在 12.89~25.48 J/cm² 能量密度下对 2024 铝合金飞机蒙皮开展了除漆实验, 研究了除漆效果、基材表面形貌、粗糙度、显微硬度及微观组织特征的变化规律, 利用 Ansys Workbench 软件模拟分析了温度场分布对除漆效果和基材表面完整性的影响。结果表明, 随着能量密度的增大, 残漆率降低, 基材表面粗糙度(S_a)和峰谷高度差(PVHD)增大, 显微硬度小幅提升, 同时表面晶粒细化, 位错密度增大, 强化相 $\sigma(\text{Al}_5\text{Cu}_8\text{Mg}_2)$ 析出, 当能量密度大于 22.90 J/cm² 时, 漆层彻底清除。在 22.90 J/cm² 的能量密度下, 漆层与基材交界处的温度为 415.46 °C, 低于基材的初始熔化阈值, 基材表面未发生明显的塑性变形, PVHD 为 8.28 μm , 显微硬度相较于原始试样提高了 2.8%, 获得了良好的表面完整性。研究结果为提升激光除漆技术在航空工程领域中的应用可靠性与安全性提供了参考。

关键词 激光技术; 激光除漆; 飞机铝合金蒙皮; 表面完整性; 温度场

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221031

1 引言

飞机大修(D检)、客机改货机以及蒙皮结构意外损伤维修时, 需要进行整机或局部蒙皮除漆, 以便检测裂纹等潜在的安全风险^[1]及重新涂装。传统的飞机蒙皮除漆工艺主要有化学溶剂除漆、手工打磨除漆和喷丸除漆^[2], 这些方法难以满足飞机蒙皮除漆对质量、效率及环保等方面的要求。激光除漆作为一种新型的表面清洗技术, 通过高能激光束辐照去除涂层表面, 利用涂层与基材间的热应力效应和烧蚀效应去除基材表面漆层^[3], 具有远程可控、绿色环保、经济高效等优点^[4-5], 可有效替代传统飞机蒙皮除漆工艺。

1974年, 美国首次使用激光成功去除铝合金基体表面的漆层^[6]。自此以后, 国内外学者对激光除漆机理、工艺参数、效率和效果进行了广泛研究。表明激光除漆是一项多机理交互作用、多参数综合影响的表面清洗技术, 漆层与基材的理化特性、光束的类型与质量、除漆工艺参数以及清洗环境等都会对除漆效果产生不同程度的影响^[7-13]。然而, 关于激光除漆过程中光热、光力效应对基材表面完整性的潜在影响则缺乏深入研究。因此, 为了提升激光除漆技术的可靠性与安全性, 促进其在航空工程领域中的应用, 需关注激光除漆后基材表面完整性的变化, 因为表面完整性对材料

性能和寿命有着重要影响。

表面完整性主要包括力学性能、表面形貌特征和表面微观特征, 如表面粗糙度、表面显微硬度、表面微观组织结构和残余应力等^[14-15]。胡久等^[16]对比了激光除漆和溶剂除漆对飞机蒙皮部件的性能影响, 结果表明, 利用两种方法除漆后试样的抗拉强度、屈服强度、延伸率等差异不大。然而, 刘鹏飞等^[17]研究发现, 激光除漆使基材表面硬度和强度显著增大。同时, Pantelakis等^[18]发现, 激光除漆后材料的塑韧性降至原始水平的 66%~77%, 材料脆化及应力腐蚀开裂的可能性增大。蒋一岚等^[19]利用高重复频率 CO₂ 激光器对飞机蒙皮上的 90 μm 厚双层复合油漆进行了去除研究, 结果表明, 在激光扫描间距为 0.1 mm、平均功率密度为 13.1 kW/cm² 的参数条件下, 漆层完全清除且不会损伤基底。但是, Klingenberg等^[20]分别使用脉冲宽度为 1 μs 的 CO₂ 激光器和脉冲宽度为 10 μs 的 Nd:YAG 激光源对 2024-T3 铝合金飞机蒙皮进行除漆实验, 除漆后铝合金基体的表面粗糙度增至 3.175 μm , 基体表面温度升高, 累计温度达到 149 °C 时会造成基体损伤。罗红心等^[21]则利用连续波(CW)CO₂ 激光源研究了 2024 铝合金的激光除漆, 结果表明, 激光除漆容易引起基体温升, 为了避免基体损伤, 处理过程中表面温度不能超过 70 °C。

收稿日期: 2022-07-07; 修回日期: 2022-07-25; 录用日期: 2022-09-01; 网络首发日期: 2022-09-12

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(2021YFSY0025)、四川省自然科学基金(2022NSFSC1903)、中央高校基本科研业务费专项资金(J2022-033)

通信作者: *ywfcyy@163.com

上述针对除漆后基材表面完整性的研究主要集中在力学性能和表面损伤方面,对其他方面的研究较少,这制约了激光除漆技术在航空装备上的应用。因此本文研究了激光除漆后基材表面形貌、表面粗糙度、表层显微硬度和微观组织等表面完整性的变化。此外,本文结合有限元分析法研究了不同能量密度下的温度场分布,进一步讨论了温度场对漆层去除效果和基材表面完整性的影响,揭示了激光除漆过程中基材微观组

织演变与硬度变化的内在联系机制。

2 材料与方法

2.1 材料制备

实验材料选用飞机蒙皮常用的 2024-T351 航空铝合金板,使用精密切割机加工成尺寸为 20 mm×20 mm×1 mm 的矩形试样。均匀喷漆时的环境温度为 12~35 ℃,相对湿度为 30%~80%,涂层体系如图 1 所示。

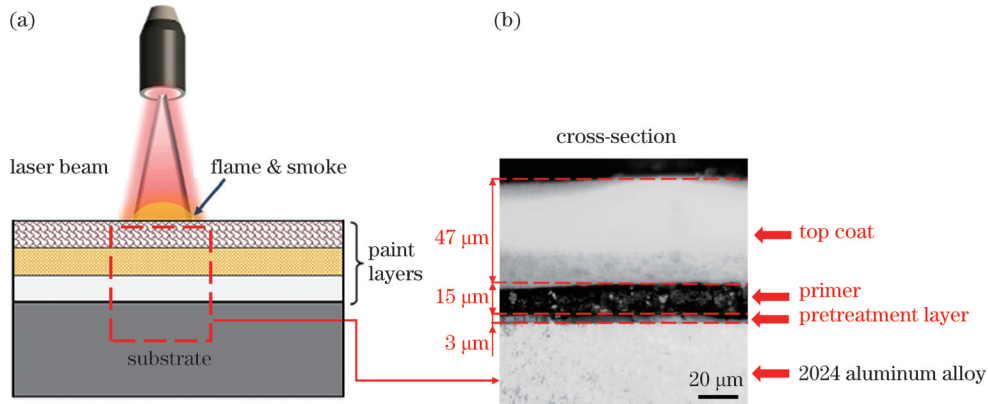


图 1 激光除漆样品的涂层体系。(a)示意图;(b)显微照片

Fig. 1 Coating system of laser paint removal sample. (a) Schematic; (b) micrograph

2.2 激光除漆

激光清洗设备由脉冲光纤激光器、激光控制系统、多姿态机器人和激光清洗头等组成,示意图如图 2 所

示。在试样表面通过二维振镜转动来实现激光光斑的定向高速移动,本文采用“S”形光斑移动路径扫描试样表面,如图 3 所示。

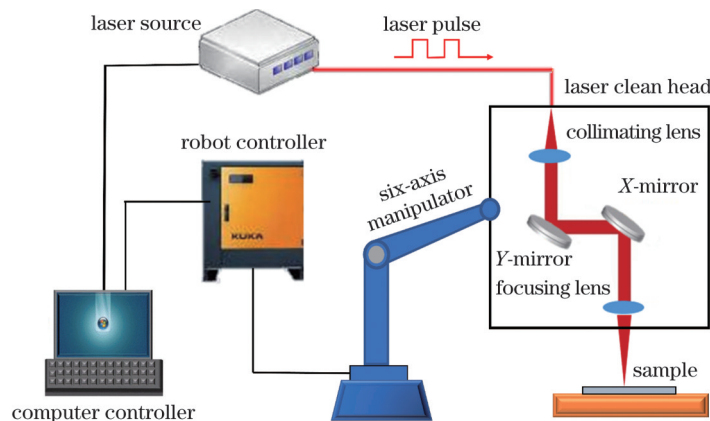


图 2 激光清洗设备示意图

Fig. 2 Schematic of laser cleaning equipment

激光器脉冲能量在圆形光斑上服从高斯分布,场镜聚焦距离为 197 mm,光斑聚焦直径为 50 μm,主要参数如表 1 所示。

文献[22]表明,漆层的损伤阈值为 10.37 J/cm²,铝合金基体的损伤阈值为 24.07 J/cm²。本文参考该研究结果,在预实验基础上设定重复频率为 90 kHz,扫描速度为 2700 mm/s,脉宽为 150 ns。通过改变激光功率来调整能量密度的大小,能量密度公式^[14]为

$$F = \frac{4P}{\pi f D^2}, \quad (1)$$

式中:F为激光能量密度;P为激光平均功率;D为光斑直

径;f为激光重复频率。为了确保激光处理表面的能量分布均匀,除漆时使光束垂直辐照样品表面,并使光斑间距(x方向)与线间距(y方向)保持一致。光斑间距公式为

$$L_x = \frac{v}{f}, \quad (2)$$

式中:v为激光扫描速率。

2.3 测试表征

使用三目连续变焦立体显微镜(SM)测试样品表面宏观形貌以评估除漆效果。除漆后的表面二维形貌采用台式扫描电镜(SEM)表征;三维形貌和粗糙度通过非接触式激光扫描共聚焦显微镜(LSCM)及配套的

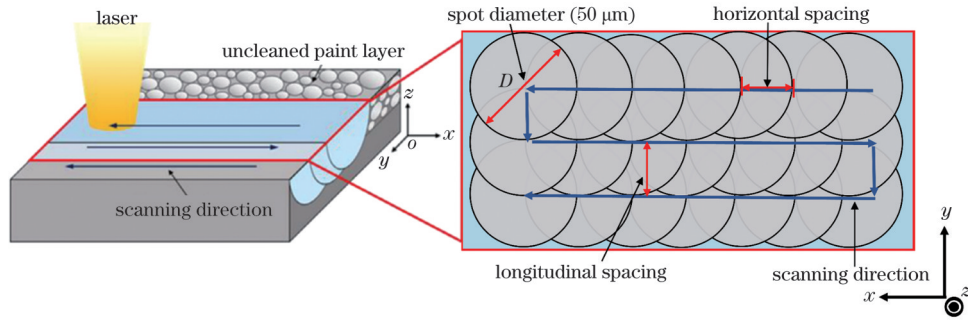


图 3 激光扫描路径示意图

Fig. 3 Schematic of laser scanning path

表 1 激光器的主要参数

Tab 1 Main parameters of laser

Wavelength λ / nm	Average power P / W	Pulse duration τ / ns	Pulse frequency f / kHz	Scan speed v / (mm/s)	Trigger mode
1064	0-120	60-350	1-200	0-8000	Pulsed

分析软件 Senso VIEW 进行表征测试。

表面及剖面显微硬度通过维氏显微硬度计进行测试。加载载荷为 200 g, 加载时间为 10 s, 从表面开始沿剖面深度方向以 20 μm 为间距进行测量, 直到硬度值趋于平稳为止。同一深度下测量 5 个点并取平均值, 测试过程如图 4 所示。使用 X 射线衍射仪 (XRD) 对比分析了除漆前、后试样表面的显微结构变化。辐射类型为 Cu-K α 广角衍射, 扫描范围为 5°~90°, 扫描速度为 5(°)/min, 步长为 0.02°。

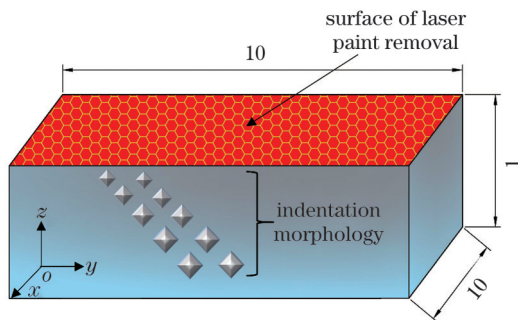


图 4 显微硬度测试示意图(单位: mm)

Fig. 4 Schematic of microhardness test (unit: mm)

2.4 数值模拟

在除漆过程中, 大部分激光能量被漆层吸收并转化为热量, 漆层局部温度迅速升高, 从而漆层以烧蚀气化的形式被清除。其中, 部分能量经热传导到达基材表面, 对基材表层产生热影响。本文根据实际激光除漆场景, 作出如下假设:

- 1) 模型材料均为连续且各向同性的材料, 物理参数不随温度发生变化;
- 2) 漆层与基体为理想接触, 且只考虑热传导;
- 3) 激光热源为高斯面热源且强度恒定。

模型初始温度为

$$T(x, y, z, 0) = T_0. \quad (3)$$

模型各边界热流密度为

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (4)$$

式中: k 为导热系数; n 是法线方向; q 是热流密度; T 为材料瞬时温度。

模拟过程使用高斯面热源, 利用 Ansys 参数化设计语言 APDL 生成高斯热源命令流, 并加载到漆层模型表面。热流密度表达式^[23]为

$$q(r) = \frac{\xi \beta P}{\pi R^2} \exp\left(-\xi \frac{r^2}{R^2}\right), \quad (5)$$

式中: $q(r)$ 是距离光斑中心 r 处的热流密度; ξ 是热流集中系数(一般取 1~3); β 是材料对脉冲能量的吸收系数; R 是光斑半径。

采用 Ansys Workbench 软件建立了尺寸为 5.000 mm × 5.000 mm × 1.000 mm 的铝合金基体和尺寸为 5.000 mm × 5.000 mm × 0.065 mm 的表面涂层体系有限元模型, 材料热物性参数^[24-26]如表 2 所示。

由于激光作用区域的热流密度和热梯度大, 为了提高计算效率和结果准确性, 前期处理中对网格单元类型和大小进行了收敛性分析和优化, 如图 5 所示。

表 2 铝合金和涂层材料的热物性参数^[24-26]

Table 2 Thermo-physical properties of aluminum alloy and paint materials^[24-26]

Parameter	Density / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Specific heat / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$)	Heat conductivity / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$)	Absorption coefficient	Melting point / °C	Boiling point / °C
Paint materials	1.3×10^3	2.5×10^3	0.3	0.11	151	165
Aluminum alloy	2.6×10^3	0.9×10^3	273.1	0.09	500-600	

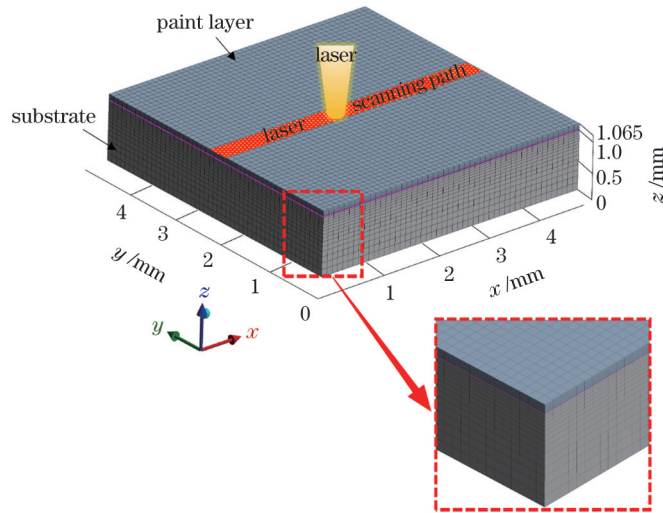


图 5 有限元网格划分

Fig. 5 Finite element meshing

3 结果与讨论

3.1 漆层去除效果

图 6 为不同激光能量密度下除漆后的 SM 照片, 根据除漆效果, 分为漆层残留和漆层除尽两种情况。由图 6(a)~(c) 可见: 当能量密度较低 ($\leq 20.04 \text{ J/cm}^2$) 时, 激光除漆能力有限, 材料表面的涂层未完全除尽, 漆层尚有残留, 且由于光斑能量分布不均, 很难实现精确分层除漆。当能量密度为 12.89 J/cm^2 时 [图 6(a)], 面漆基本除净, 但仍然有少量离散分布的白色块状面漆残留在锌黄色底漆表面上; 当能量密度增大到 20.04 J/cm^2 时 [图 6(c)], 出现氧化膜击穿和基体裸露共存现象。图 6(d)~(f) 表明: 当能量密度增大

($\geq 22.90 \text{ J/cm}^2$) 时, 除漆效果明显提升, 表面涂层彻底清除, 同时基材表面出现烧蚀或熔融现象。当能量密度为 22.90 J/cm^2 时 [图 6(d)], 清洗深度已至基材表面, 虽然表面完好, 但由于激光烧蚀作用, 出现了轻微浅黑色烧蚀痕迹; 当能量密度增至 25.48 J/cm^2 [图 6(f)] 时, 激光热效应明显增强, 能量密度达到基材损伤阈值, 激光烧蚀导致基底熔化并形成不规则凹坑, 表面完整性受到显著影响。

上述研究表明, 在漆层完全除尽的同时, 基材表面受到了不同程度的影响。为了验证飞机蒙皮激光除漆的可靠性, 本文将进一步研究漆层完全除尽后试样表面完整性相较原始铝合金试样的变化。

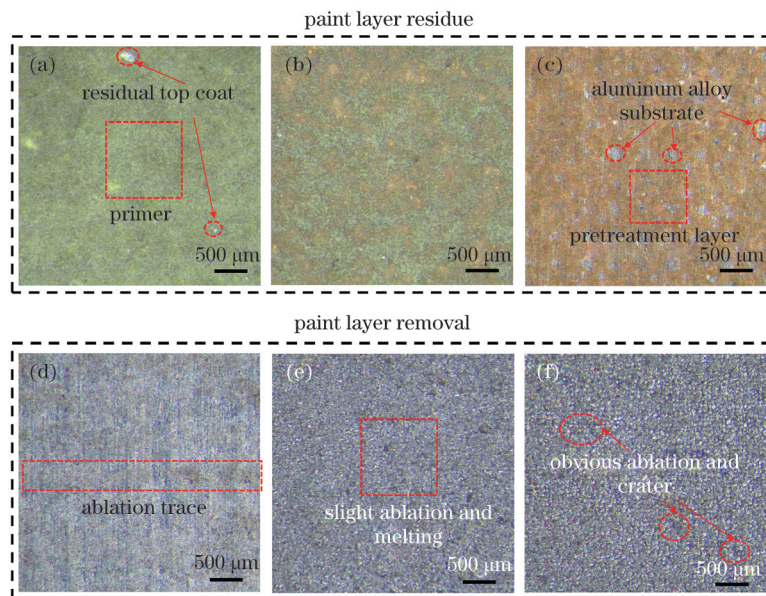


图 6 不同能量密度下除漆后试样表面的宏观形貌照片。(a) 12.89 J/cm^2 ; (b) 17.08 J/cm^2 ; (c) 20.04 J/cm^2 ; (d) 22.90 J/cm^2 ; (e) 24.34 J/cm^2 ; (f) 25.48 J/cm^2

Fig. 6 Macro morphology photos of sample surface after paint removal under different energy densities. (a) 12.89 J/cm^2 ; (b) 17.08 J/cm^2 ; (c) 20.04 J/cm^2 ; (d) 22.90 J/cm^2 ; (e) 24.34 J/cm^2 ; (f) 25.48 J/cm^2

3.2 表面形貌与粗糙度

表面形貌与粗糙度是表征材料表面完整性的重要指标。图 7 为原始试样和漆层除尽后各试样表面的二维、三维微观形貌。图 8 为表面粗糙度(S_a)和最大峰谷高度差(PVHD)的变化趋势。由图 7 可知,原始试样表面沿纵向(y 方向)分布着轧制金属条纹及氧化物颗粒[图 7(a)]。在 22.90 J/cm^2 的激光能量密度下,基材表面金属条纹淡化,氧化物颗粒消失,样品表面相对平整[图 7(b)]。结合图 8 发现,原始试样的 S_a 和 PVHD 分别为 $0.46 \mu\text{m}$ 和 $13.01 \mu\text{m}$,当能量密度为 22.90 J/cm^2 时,样品表面的 S_a 和 PVHD 分别为 $0.39 \mu\text{m}$ 和 $8.28 \mu\text{m}$,小于原始试样。当能量密度

增大到 24.34 J/cm^2 时,基材表面出现塑性凹坑变形,这是因为光斑能量呈高斯分布,中心温度和冲击效应较边缘更强,所以中心熔融物向边缘涌动,中部塌陷;且在激光扫描移动方向(x 方向)由于凹坑相互搭接挤压,形成鱼鳞状表面形貌[图 7(c)]。当能量密度增至 25.48 J/cm^2 时,激光与铝合金基体之间的热效应增强,温度急剧升高,基体表面的熔融更加充分,由于激光冲击作用,熔融态基底在凹坑边缘呈溅射状分布[图 7(d)],基体表面更加粗糙不平, S_a 和 PVHD 分别达到 $0.71 \mu\text{m}$ 和 $18.14 \mu\text{m}$,与能量密度为 22.90 J/cm^2 时的基材表面相比,分别增加了 82% 和 119%。

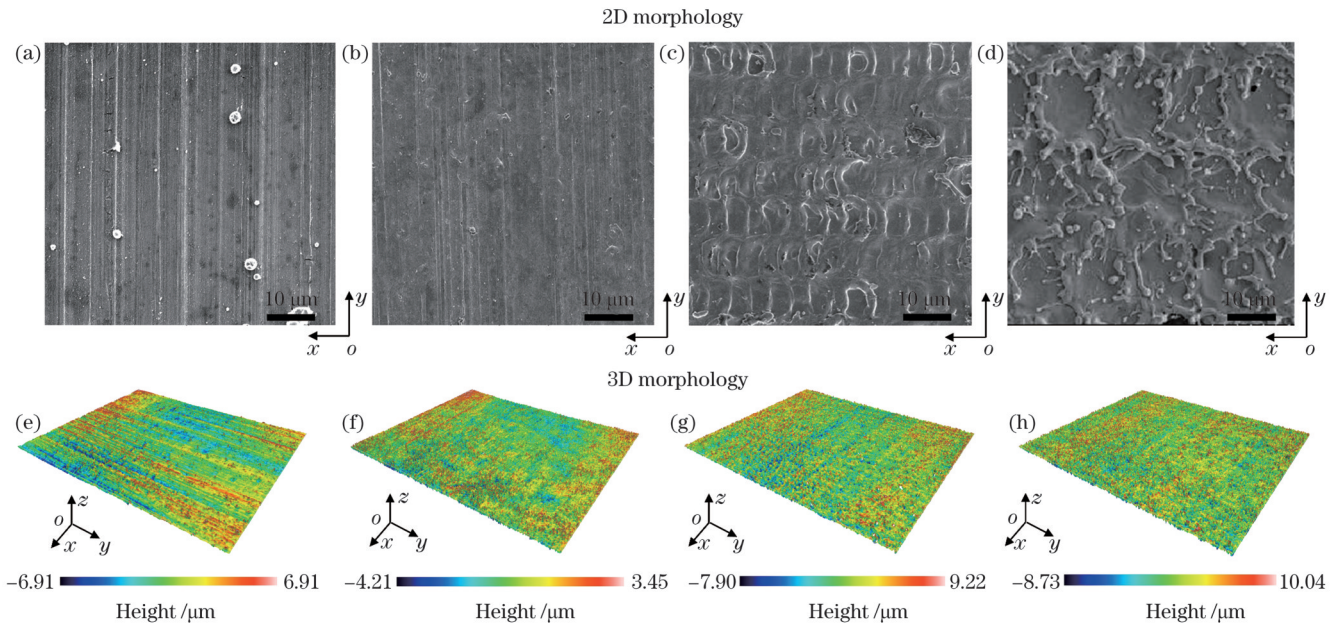


图 7 原始试样与激光除漆后试样表面的二维、三维微观形貌。(a)(e)原始试样;(b)(f) 22.90 J/cm^2 ;(c)(g) 24.34 J/cm^2 ;(d)(h) 25.48 J/cm^2
 Fig. 7 2D and 3D surface morphologies of original sample and sample after laser paint removal. (a)(e) Original sample; (b)(f) 22.90 J/cm^2 ; (c)(g) 24.34 J/cm^2 ; (d)(h) 25.48 J/cm^2

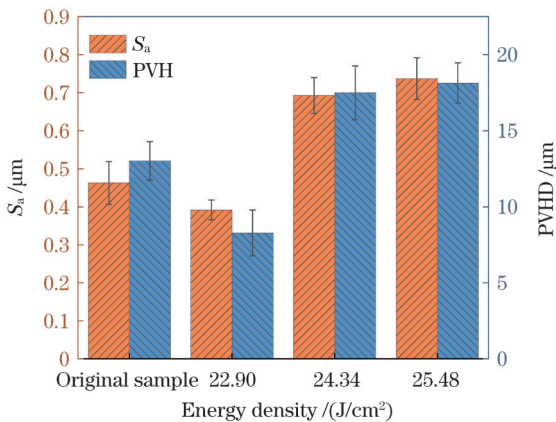


图 8 原始试样与激光除漆后试样的 S_a 和 PVHD
 Fig. 8 S_a and PVHD of original sample and sample after laser paint removal

材料表面处理后的粗糙度增加,这会提高涂层与基材之间的结合力,有利于喷漆重涂性^[27]。但一般规

定处理后的表面粗糙度应小于 $3.2 \mu\text{m}$,峰谷高度差应小于 $100 \mu\text{m}$,因为高度差过大时漆膜无法覆盖波峰,漆膜下形成气泡的可能性增大^[24]。综上分析,在上述几种能量密度下除漆后, S_a 和 PVHD 均符合飞机铝合金蒙皮涂装工艺要求。

3.3 显微硬度

样品(原始试样与漆层完全除尽试样)表面和剖面的显微硬度与典型压痕形貌如图 9 所示。由图 9(a)可知,原始试样的表层显微硬度值在 $120 \sim 145 \text{ HV}$ (标准硬度)范围内波动。激光除漆后,试样表面硬度增加,在 22.90 、 24.34 、 25.48 J/cm^2 能量密度下,显微硬度值分别增加约 2.8%、12.3% 和 31.0%。飞机蒙皮材料使用标准规定,表面处理后材料性能变化不能超过 5%。因此,当能量密度为 22.90 J/cm^2 时,基材硬度变化满足这一要求。

此外,除漆后试样的显微硬度值随着测量深度

的增加而逐渐降低,最终与原始试样趋于同一水平,三种能量密度下分别形成了约 15、40、68 μm 厚的硬化层[图 9(a)]。图 9(b)显示,在相同深度下,随着能量密度的增加,压痕变小;随着测量深度

的增大,压痕变大。这表明激光除漆会导致基材表层硬度增加,显微硬度值与距离表面的深度和激光能量密度有关,能量密度越大,硬度提升越大,硬化层越厚。

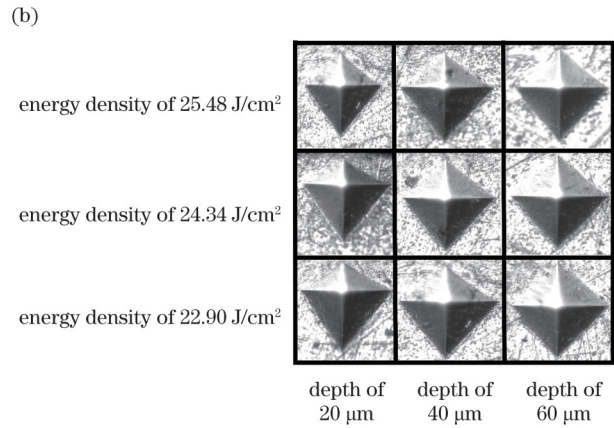
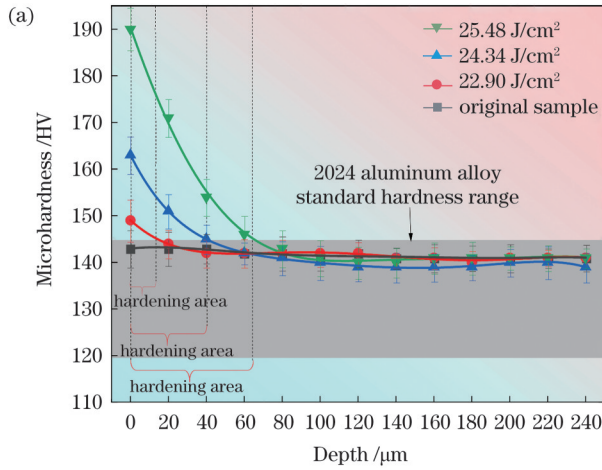


图 9 试样显微硬度与典型压痕形貌。(a)显微硬度随深度的变化曲线;(b)不同深度和能量密度下的典型压痕形貌

Fig. 9 Microhardnesses and typical indentation morphologies of samples. (a) Microhardness versus depth; (b) typical indentation morphologies at different depths and energy densities

在激光清洗过程中,激光冲击与热效应的共同作用使基材表面发生熔融和塑性变形^[28]。除漆时激光能量转化为热量,经漆层传导被基体吸收,使得基材迅速升温,当达到一定温度时发生熔化。随着激光束的转移,无持续能量注入,基材又迅速降温凝固。温度的急升骤冷会导致基材表层形成新的组织结构与缺陷,如塑性变形、位错运动、强化相析出、晶粒细化等。材料微观组织结构的变化必然引起力学性能改变^[29],泰勒硬化定律^[30]为

$$\sigma_y = M\alpha Gb\sqrt{\rho}, \quad (6)$$

式中: σ_y 是临界剪应力; M 是泰勒因子; α 是无量纲预因子,面心立方结构为 0.2; G 是各向同性剪切模量; b 是 Burgers 矢量; ρ 是位错密度。式(6)表明,位错密度的增加会导致金属显微硬度增大。

为了进一步探索材料微观组织演变与硬度增加的关系,阐明激光除漆对基材的影响以及硬度提升的内在机制,本文在下节对除漆后试样表面的微观组织进行了测试分析。

3.4 X 射线衍射分析

为了研究激光除漆对基体材料表面微观组织的影响,对原始试样和漆层除尽后的试样进行 XRD 测试分析。平均亚晶粒尺寸根据 Scherrer 公式^[31]进行估算:

$$D' = \frac{K\lambda}{B \cos \theta}, \quad (7)$$

式中: D' 为平均亚晶尺寸; K 为晶体形状因子(一般取 $K = 0.89$); λ 为 X 射线波长; θ 为布拉格角; B 为衍射峰的半峰全宽。

微应变根据 Williamson-Hall 方程^[32]计算:

$$4\epsilon \tan \theta + \frac{K\lambda}{D' \cos \theta} = \frac{K\lambda}{D'} + 4\epsilon \sin \theta, \quad (8)$$

式中: ϵ 为微应变的均方根。铝为面心立方(FCC)晶格结构,一般取 $b = a/\sqrt{2}$,其中 a 表示晶格参数。

位错密度计算公式^[33]为

$$\rho = \frac{3\sqrt{2\pi}(\epsilon^2)^{1/2}}{D'b}. \quad (9)$$

XRD 测试结果如图 10(a)所示。结果显示,与原始试样相比,除漆后试样表面有新相生成,比对 PDF 卡片(65-1852)证明除漆后形成了 $\sigma(\text{Al}_5\text{Cu}_6\text{Mg}_2)$ 相, σ 相在合金中主要起强化和硬化的作用^[34]。图 10(b)所示为衍射角 $42^\circ \sim 48^\circ$ 范围内(200)峰的局部放大图,可以看出,随着能量密度的增大,除漆后衍射峰逐渐向右偏移,这表明出现了压缩残余应力和应变^[35]。图 10(c)所示为各试样(200)衍射峰的半峰全宽(FWHM),结果表明,随着能量密度的增加,Bragg 衍射峰变宽,FWHM 单调增加,这与除漆后材料表层的位错密度增加有关^[29]。

此外,式(7)、(9)的计算结果表明:与原始试样相比,除漆后试样基材表面的平均亚晶粒尺寸变小,且随能量密度的增加而逐渐减小;位错密度变大,且随能量密度的增加而逐渐增大,如图 11 所示。

X 射线衍射分析结果表明,激光除漆热效应会对基材表面微观组织产生影响,同时也揭示了除漆后基材表层微观组织演变与显微硬度增大的内在联系,如图 12 所示。

3.5 温度场模拟

从上述实验测试结果可知,除漆过程中激光热效应发挥着主导作用。为进一步研究热效应对漆层去除

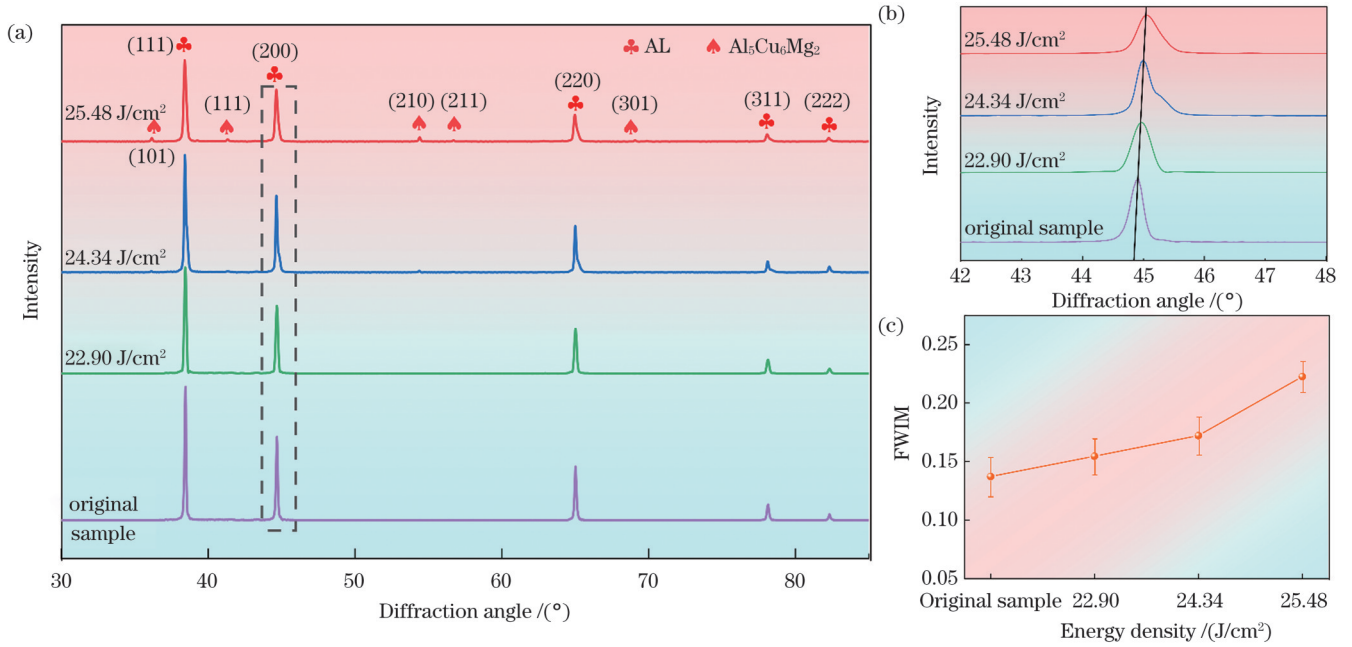


图 10 原始试样和激光除漆后试样表面的 XRD 测试结果。(a)XRD 图谱；(b)(200)衍射峰的局部放大图；(c)(200)衍射峰的半峰全宽
 Fig. 10 Surface XRD test results of original samples and samples after laser paint removal. (a) XRD pattern; (b) partial enlarged view of (200) diffraction peak; (c) FWHM of (200) diffraction peak

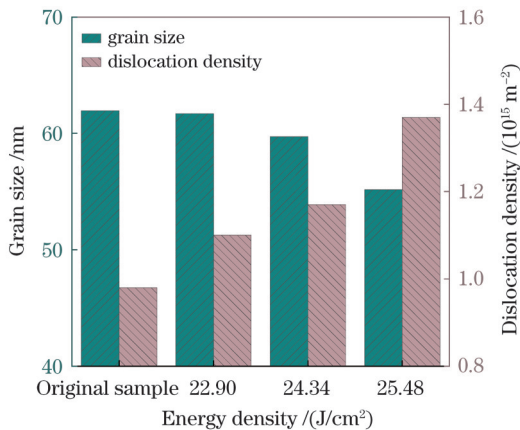


图 11 原始试样与激光除漆后试样的表面晶粒尺寸和位错密度
 Fig. 11 Surface grain sizes and dislocation densities of original sample and sample after laser paint removal

和基材表面完整性的影响,本文通过有限元分析方法模拟了上述六种能量密度下的温度场分布。

图 13 为试样剖面温度场的分布云图。随着能量密度的增大,温度场的分布范围扩大,热影响区也逐渐增大,这一结果与文献[23]的模拟结果有相似的规律。在漆层残余的能量密度(12.89、17.08、20.04 J/cm²)条件下,温度场呈现出典型的“碗状”分布,如图 13(a)~(c)所示。在漆层完全除尽的能量密度条件(22.90、24.34、25.48 J/cm²)下,由于激光作用于漆层表面的能量增大,温度场向基体延伸,但在漆层与基体交界处发生了突变,如图 13(d)~(f)所示,这是涂层和基材巨大的热物性参数差异所导致的。

图 14 为不同能量密度下温度随深度的变化规律。结果显示,在漆层残余的能量密度条件下[图 14(a)],

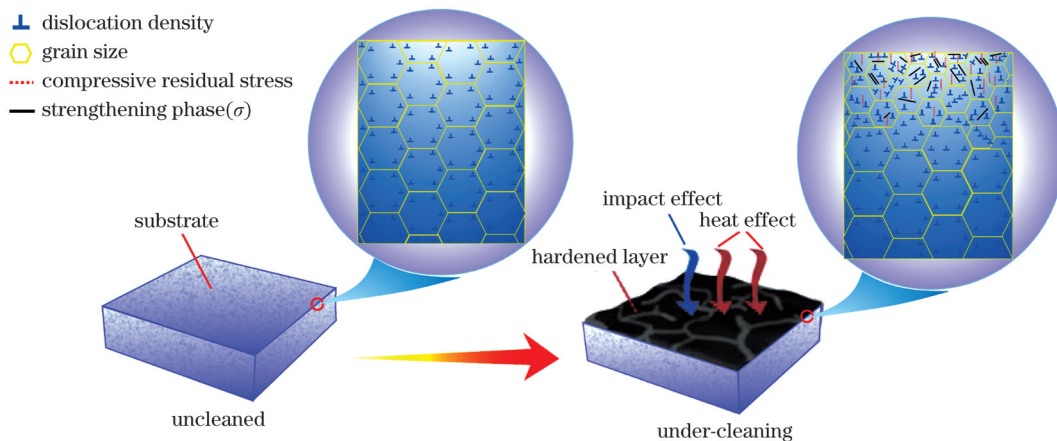


图 12 除漆前、后基材表层微观结构的演变示意图

Fig. 12 Schematics of surface layer microstructure evolution of substrate before and after paint removal

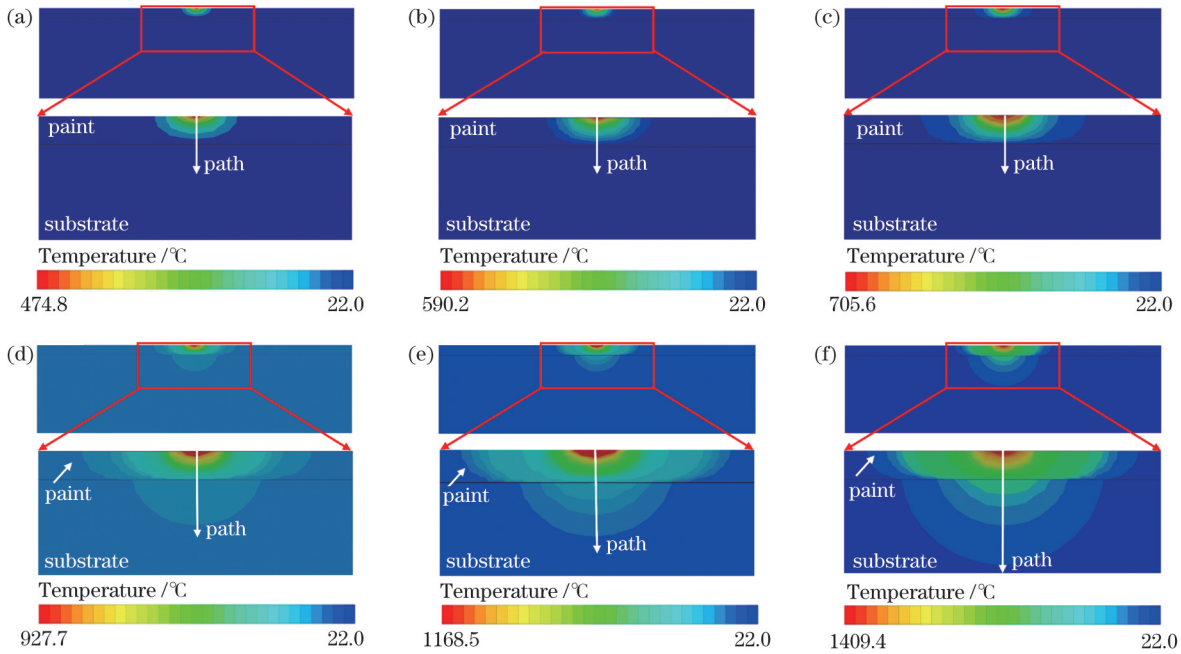


图 13 不同能量密度下的温度场分布云图。(a) 12.89 J/cm²; (b) 17.08 J/cm²; (c) 20.04 J/cm²; (d) 22.90 J/cm²; (e) 24.34 J/cm²; (f) 25.48 J/cm²

Fig. 13 Cloud diagrams of temperature field distributions under different energy densities. (a) 12.89 J/cm²; (b) 17.08 J/cm²; (c) 20.04 J/cm²; (d) 22.90 J/cm²; (e) 24.34 J/cm²; (f) 25.48 J/cm²

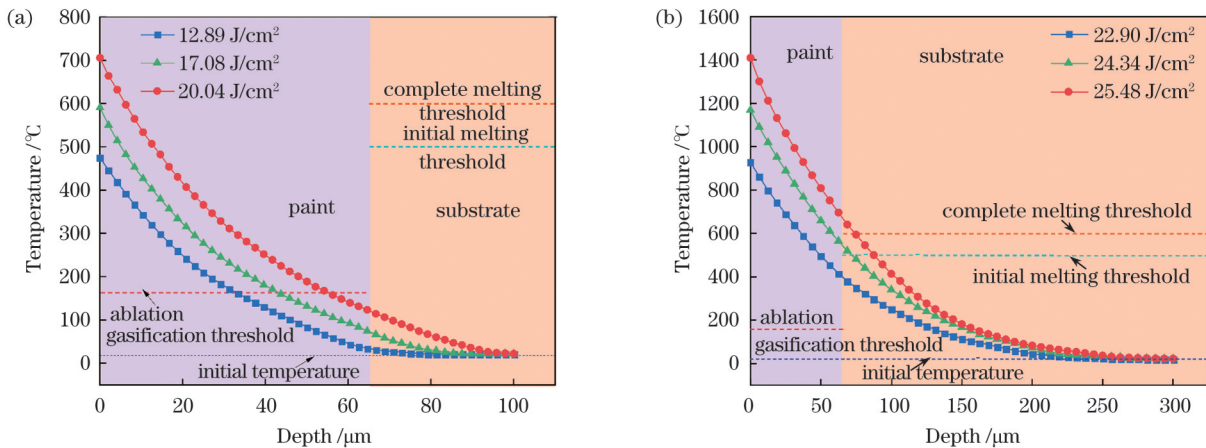


图 14 不同能量密度下温度随深度的变化曲线。(a) 漆层残余; (b) 漆层除尽

Fig. 14 Temperature versus depth at different energy densities. (a) Paint layer residue; (b) paint layer removal

漆层表面温度已超过其气化阈值,但基材表面温度尚未达到阈值,说明在以上能量密度下,仅部分漆层去除,基材表面仍有未烧蚀气化的残余漆层。对比图 6(a)~(c)所示的除漆效果,发现实际除漆量比模拟除漆量略大。这是因为在实验过程中,随着漆层的去除变薄,漆层与基材之间的热应力振动提高了漆层的去除效率^[36];此外,相邻光斑间的热量传递和积累也会造成实际烧蚀气化的漆层量更多。

当漆层除尽时[图 14(b)],由于激光能量密度较大,漆层升温效果明显,激光作用区域的基材表面最高温度分别达到了 415.5、519.3、634.7 °C,高于漆层的烧蚀气化阈值,说明漆层完全烧蚀气化。当能量密度为 22.90 J/cm²时,基材表面温度低于 2024 铝合金的初融

温度 500 °C,表面未发生明显熔融现象。当能量密度为 24.34 J/cm²和 25.48 J/cm²时,随着热流密度的增大,激光作用区域所吸收的能量增加,由于热量积累,基材表面温度超过铝合金熔化阈值,烧蚀熔融现象越加严重,这与图 6(d)~(f)所示结果基本一致。通过对温度场的分析可知,漆层和基材材料吸收激光能量后产生的温度场是影响除漆效果和基材表面完整性的关键。

4 结 论

对飞机铝合金蒙皮进行了激光除漆实验,在所讨论的能量密度范围内,根据除漆效果可分为漆层残余和漆层除尽两种情况。当能量密度大于等于 22.90 J/cm²

时,由于激光注入能量增大,漆层逐渐除尽,同时由于热量的积累,基材表面开始出现烧蚀熔融现象。基体表面 S_a 和PVHD的测量结果表明,漆层除尽后, S_a 和PVHD随着能量密度的增加而增大,在22.90~25.48 J/cm²的能量密度范围内, S_a 从0.39 μm 增大到0.71 μm ,PVHD从8.28 μm 增大到18.14 μm ,符合飞机铝合金蒙皮的涂装工艺要求。

除漆后基材表层显微硬度和XRD的测试结果表明,激光除漆热效应会导致基材表面发生塑性变形和微观组织变化,从而使得基材表层显微硬度小幅提升,且能量密度越大,硬度值提升越大。当能量密度为22.90 J/cm²时,除漆后显微硬度相较于原始试样仅增加2.8%,满足飞机蒙皮材料性能变化不超过5%的使用要求。温度场模拟结果表明,激光除漆时漆层和基体吸收激光能量后形成的温度场是影响除漆效果和基材表面完整性的关键。

参 考 文 献

- Merati A, Yanishevsky M, Despicic T, et al. The effect of atmospheric plasma paint stripping on the fatigue crack growth properties of aluminium substrates[J]. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2017, 5(4): 161-173.
- Kozol J, Conrad D, Hartle S, et al. Aircraft depainting technology [R]. Patuxent River: Naval Air Warfare Center Aircraft Division, 1999.
- 宣善勇. 飞机复合材料部件表面激光除漆技术研究进展[J]. *航空维修与工程*, 2016(8): 15-18.
Xuan S Y. Study on laser paint stripping technology for aircraft composite parts[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2016(8): 15-18.
- Siano S, Agresti J, Cacciari I, et al. Laser cleaning in conservation of stone, metal, and painted artifacts: state of the art and new insights on the use of the Nd: YAG lasers[J]. *Applied Physics A*, 2012, 106(2): 419-446.
- 王泽敏, 曾晓雁, 黄维玲. 激光清洗工艺的发展现状与展望[J]. *激光技术*, 2000, 24(2): 68-73.
Wang Z M, Zeng X Y, Huang W L. Status and prospect of laser cleaning procedure[J]. *Laser Technology*, 2000, 24(2): 68-73.
- Fox J A. Effect of water and paint coatings on laser-irradiated targets[J]. *Applied Physics Letters*, 1974, 24(10): 461-464.
- 李宇强, 郭玲玉, 蒋平, 等. 铝合金激光清洗表面形貌变化的实验研究及工艺参数优化[J]. *中国激光*, 2021, 48(22): 2202016.
Li Y Q, Guo L Y, Jiang P, et al. Experimental study on surface morphology changes of aluminum alloy using laser cleaning and optimization of process parameters[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(22): 2202016.
- 秦哲, 高谦, 王斌, 等. 飞机蒙皮纳秒脉冲激光除漆工艺与机理研究[J]. *表面技术*, 2022, 51(7): 370-376, 396.
Qin Z, Gao Q, Wang B, et al. Technology and mechanism of nanosecond pulse laser paint removal of aircraft skin[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(7): 370-376, 396.
- 赵海朝, 乔玉林, 杜娴, 等. 能量密度对激光清洗铝合金漆层的影响及作用机理[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 131403.
Zhao H C, Qiao Y L, Du X, et al. Effect and mechanism of energy density on the aluminum alloy paint cleaned by laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 131403.
- Li X K, Zhang Q H, Zhou X Z, et al. The influence of nanosecond laser pulse energy density for paint removal[J]. *Optik*, 2018, 156: 841-846.
- 刘世光, 孙树峰, 王萍萍, 等. 激光入射角度对去除 2024 铝合金表面油漆的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(17): 1714009.
Liu S G, Sun S F, Wang P P, et al. Effect of laser incident angle on paint removal of 2024 aluminum alloy surface[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(17): 1714009.
- 雷正龙, 孙浩然, 田泽, 等. 不同时间尺度的激光对铝合金表面油漆层清洗质量的影响[J]. *中国激光*, 2021, 48(6): 0602103.
Lei Z L, Sun H R, Tian Z, et al. Effect of laser at different time scales on cleaning quality of paint on Al alloy surfaces[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(6): 0602103.
- 刘伟军, 赵子铭, 李强, 等. 激光清洗 2A12 铝合金复合漆层的技术研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(8): 0802013.
Liu W J, Zhao Z M, Li Q, et al. Laser cleaning technology of 2A12 aluminum alloy composite paint layer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(8): 0802013.
- Shan T, Yin F S, Wang S J, et al. Surface integrity control of laser cleaning of an aluminum alloy surface paint layer[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(30): 9313-9319.
- Qin Z, Li B, Huang X, et al. The effect of laser shock peening on surface integrity and high and very high cycle fatigue properties of 2024-T351 aluminum alloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 149: 107897.
- 胡久, 马路, 王文全, 等. 激光除漆与溶剂除漆对飞机蒙皮零件的性能影响[J]. *金属世界*, 2017(6): 6-9.
Hu J, Ma L, Wang W Q, et al. Influence of laser paint removal and solvent paint removal on aircraft skin parts[J]. *Metal World*, 2017(6): 6-9.
- 刘鹏飞, 王思捷, 殷凤仕, 等. 2024 铝合金表面激光除漆工艺及机理[J]. *材料导报*, 2020, 34(24): 24121-24126.
Liu P F, Wang S J, Yin F S, et al. Process and mechanism of laser removal of paint on 2024 aluminum alloy[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(24): 24121-24126.
- Pantelakis S G, Kermanidis T B, Haidemenopoulos G N. Mechanical behavior of 2024 Al alloy specimen subjected to paint stripping by laser radiation and plasma etching[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 1996, 25(2): 139-146.
- 蒋一岚, 叶亚云, 周国瑞, 等. 飞机蒙皮的激光除漆技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(12): 1206003.
Jiang Y L, Ye Y Y, Zhou G R, et al. Research on laser paint removing of aircraft surface[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1206003.
- Klingenberg M L, Naguy D A, Naguy T A, et al. Transitioning laser technology to support air force depot transformation needs[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, 202(1): 45-57.
- 罗红心, 程兆谷. 大功率连续 CO₂ 激光器用于飞机激光去漆[J]. *激光杂志*, 2002, 23(6): 52-53.
Luo H X, Cheng Z G. High power CW CO₂ Laser using in aircraft laser paint removing[J]. *Laser Journal*, 2002, 23(6): 52-53.
- Yang W F, Fu C Y, Qian Z R, et al. Effect of beam incident angle on the energy distribution and damage characteristics of laser paint removal spots on an Al alloy surface[J]. *Lasers in Engineering*, 2022, 53(1/2): 19-35.
- 郭召恒. 纳秒脉冲激光除漆的数值模拟与实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020: 29-45.
Guo Z H. Numerical simulation and experimental research on nanosecond pulse laser paint removal[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020: 29-45.
- 高辽远, 周建忠, 孙奇, 等. 激光清洗铝合金漆层的数值模拟与表面形貌[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0502002.
Gao L Y, Zhou J Z, Sun Q, et al. Numerical simulation and surface morphology of laser-cleaned aluminum alloy paint layer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0502002.
- Zhang Z Y, Zhang J Y, Wang Y B, et al. Removal of paint layer by layer using a 20 kHz 140 ns quasi-continuous wave laser[J]. *Optik*, 2018, 174: 46-55.
- 邵壮, 王涛. 基于 ANSYS 的激光除漆技术数值模拟研究[J]. *激光与红外*, 2021, 51(10): 1294-1299.

- Shao Z, Wang T. Numerical simulation of laser paint removal technology based on ANSYS[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(10): 1294-1299.
- [27] Chen H, Lee S W, Hur B Y. Influence of deposition parameters on adhesion/cohesion of plasma sprayed TiO₂ coatings[J]. *Materials Science Forum*, 2006, 510/511: 62-65.
- [28] Shi T Y, Wang C M, Mi G Y, et al. A study of microstructure and mechanical properties of aluminum alloy using laser cleaning [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 42: 60-66.
- [29] Dhakal B, Swaroop S. Mechanical properties and deformation dependent microstructural aspects of laser shock peened 7075-T6 aluminum alloy without coating[J]. *Materials Characterization*, 2022, 183: 111620.
- [30] Madec R, Kubin L P. Dislocation strengthening in FCC metals and in BCC metals at high temperatures[J]. *Acta Materialia*, 2017, 126: 166-173.
- [31] Langford J I, Wilson A J C. Scherrer after sixty years: a survey and some new results in the determination of crystallite size[J]. *Journal of Applied Crystallography*, 1978, 11(2): 102-113.
- [32] Williamson G K, Hall W H. X-ray line broadening from filed aluminium and wolfram[J]. *Acta Metallurgica*, 1953, 1(1): 22-31.
- [33] Dini G, Ueji R, Najafizadeh A, et al. Flow stress analysis of TWIP steel via the XRD measurement of dislocation density[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(10/11): 2759-2763.
- [34] Barlow I C, Rainforth W M, Jones H. Role of silicon in the formation of the (Al₅Cu₆Mg₂) σ phase in Al-Cu-Mg alloys[J]. *Journal of Materials Science*, 2000, 35(6): 1413-1418.
- [35] Fu W J, Huang Y J, Sun J F, et al. Strengthening CrFeCoNiMn_{0.75}Cu_{0.25} high entropy alloy via laser shock peening [J]. *International Journal of Plasticity*, 2022, 154: 103296.
- [36] 江国业, 雷璞, 刘宇平, 等. 油气管道激光除漆对基材组织和硬度的影响[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0302009.
- Jiang G Y, Lei P, Liu Y P, et al. Laser removal of coating on oil and gas pipelines: effects on microstructure and hardness of substrate[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0302009.

Effect of Laser Paint Removal of Aircraft Skin on Surface Integrity of Substrate

Yang Wenfeng^{1*}, Chang Xuedong¹, Hu Yue¹, Li Shaolong¹, Cao Yu², Li Qing¹

¹*Civil Aircraft Composite Material Maintenance Research Center, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China;*

²*Institute of Laser and Optoelectronics Intelligent Manufacturing Research, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, China*

Abstract

Objective Previous studies on laser paint removal from aircraft skin mainly focused on the optimization of laser paint removal parameters and the improvement of efficiency. However, to improve the reliability and safety of laser paint removal technology and promote its application in the field of aviation engineering, the potential impact of laser energy absorption on the performance of the substrate during the laser paint removal process must be clarified. According to Fourier's law of heat conduction and the law of conservation of energy, laser paint removal generally affects the properties of the surface material of the matrix, whereas surface integrity plays an important role in material performance and service life. Therefore, this study aims to investigate the effect of laser paint removal on the surface integrity of aircraft aluminum alloy skin substrates, including the substrate surface morphology and roughness, microhardness, and microstructure.

Methods In this work, paint removal experiments on 2024 aluminum alloy aircraft skins at energy densities of 12.89–25.48 J/cm² were performed using pulsed fiber laser. Then, the qualities of paint removal at different energy densities were analyzed via trinocular continuous zoom stereo microscopy (SM), scanning electron microscopy (SEM), laser confocal microscopy (LSCM), microhardness tester, and X-ray diffractometer (XRD). Subsequently, changes in the surface morphology and roughness of the substrate after removing the coating, as well as the microhardness and microstructure versus energy density, were investigated. Finally, the temperature field distributions at different energy densities were studied using finite element analysis. The effects of the temperature field on paint removal and substrate surface integrity were further discussed. Consequently, the internal relationship between the evolution of the substrate microstructure and hardness change during laser paint removal was revealed.

Results and Discussions When the energy density is relatively high (≥ 22.90 J/cm²), the paint layer is completely removed (Fig. 5). Moreover, the surface roughness (S_a) and peak valley height difference (PVHD) of the substrate gradually increase as the energy density increases (Figs. 6–7). Meanwhile, under high energy density conditions, the refinement of sub-grains on the material surface, an increase in dislocation density (Fig. 9), and precipitation of strengthening phase σ (Al₅Cu₆Mg₂) are observed (Fig. 10). As a result, a small increase in the surface hardness occurs (Fig. 8). At the energy density of 22.90 J/cm², the PVHD is 8.28 μ m. Compared with that of the original sample, the microhardness increases by 2.8%, which meets the requirements of the aircraft skin recoating process and application standards. Meanwhile, the calculation results show that the temperature at the junction of the paint layer and the substrate is 415.46 °C. The paint layer is then completely ablated and gasified. Because the temperature of the substrate surface is lower than its melting threshold (500 °C) (Fig. 13), thermoplastic deformation does not occur. The best cleanliness and surface integrity are obtained at 22.90 J/cm².

Conclusions After laser paint removal, the temperature of the substrate surface increases rapidly with the increase in energy density owing to the thermal effect of the laser. When the energy density increases to 22.90 J/cm^2 , although the roughness of the aluminum alloy substrate surface increases slightly, it still can meet the roughness requirements of the surface coating process. In addition, the surface layer of the substrate hardens owing to the plastic deformation of the material, precipitation of the strengthening phase, and refinement of subgrains. At the energy density of 22.90 J/cm^2 , the hardness of the base material increases by 2.8%, meeting the requirement that the property change of the material after paint removal should not exceed 5% in the aircraft skin material standard.

Key words laser technique; laser paint removal; aircraft aluminum alloy skin; surface integrity; temperature field